УДК 539.3

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И ПРОЧНОСТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОВОЛОЧНЫХ СПИРАЛЬНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Б.П. Белозеров, Б.А. Люкшин*, Ю.А. Митрофанов, Ю.В. Осипов**

Северский государственный технологический институт. г. Северск, E-mail: seversklink@ssti.ru
*Томский университет систем управления и радиоэлектроники. E-mail: borisljuk@mail.ru
**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. г. Томск. E-mail: eriosipov@ispms.tsc.ru

Дается анализ влияния формы оправки и диаметра (радиуса) проволоки на геометрические характеристики каналов проволочных спиральных фильтрующих элементов. Параметрическими исследованиями получены варианты конкретных форм и размеров каналов. В зависимости от характеристик материала получены оценки технологических параметров процесса навивки, обеспечивающие требуемые геометрические показатели.

Проволочные спиральные фильтрэлементы (ПСФ) хорошо зарекомендовали себя при очистке газовых и жидкостных гетерогенных систем. С 1992 по 1995 годы были изготовлены и успешно испытаны фильтрующие аппараты на Томском нефтехимическом комбинате. В настоящее время ряд аппаратов смонтирован для испытаний на Сибирском химическом комбинате. Основными достоинствами ПСФ являются простота устройства и изготовления, возможность регулирования размеров и формы фильтрующих каналов, широкий диапазон применимости, легкость очистки и полной регенерации [1].

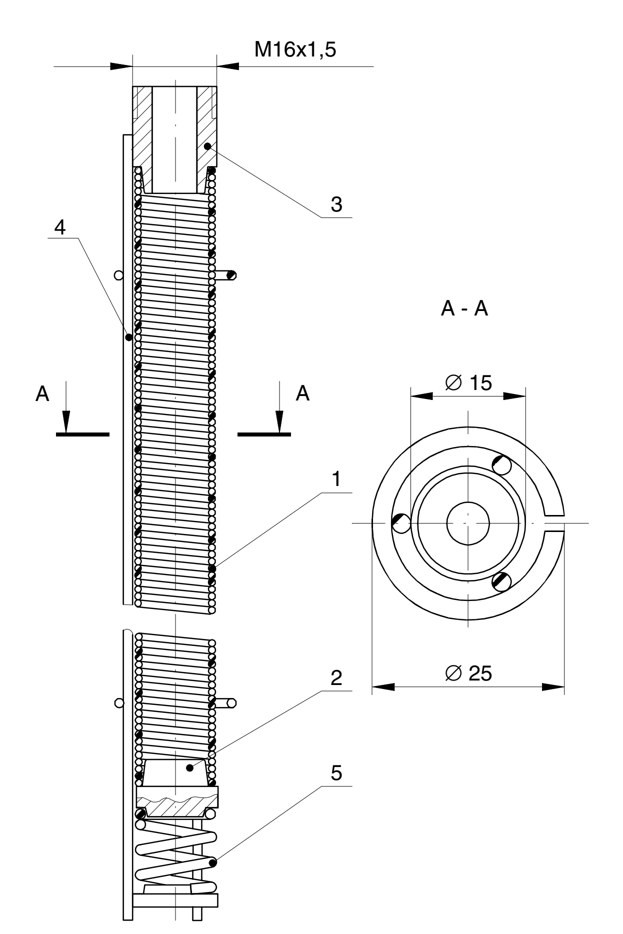


Рис. 1. *Общий вид ПСФ: 1) фильтрующая перегородка; 2) крышка; 3) штуцер; 4) каркас; 5) пружина*

Конструктивно ПСФ представляет собой витую цилиндрическую пружину с плотно прижатыми друг к другу витками (рис. 1). Ось витка представляет собой правильный многоугольник, причем каждый последующий виток повернут относительно предыдущего на определенный угол. При этом между витками образуются зазоры (микроканалы), через которые и происходит процесс фильтрации. Загрязненная среда подается снаружи под давлением или всасывается за счет разрежения, создаваемого внутри ПСФ. Мелкодисперсные твердые частицы остаются на наружной поверхности ПСФ в виде "шубы" – кольцевого цилиндрического слоя.

Для регенерации или очистки ПСФ чистая газовая или жидкая среда подается внутрь элемента, в обратном направлении по отношению к рабочему. При этом витки пружины разжимаются, а вся нафильтрованная масса сбрасывается в шламовое пространство для выгрузки из аппарата.

Изготовление ПСФ проводится путем навивки проволоки с круглым поперечным сечением на оправку. Оправка представляет собой профилированный пруток с поперечным сечением (профилем) в виде правильного многоугольника. Изменением радиуса проволоки, размеров и числа сторон сечения оправки можно изменять размеры и форму фильтрующих отверстий. При этом должны меняться и технологические параметры процесса навивки, в частности, усилие натяжения проволоки.

Ниже анализируются два аспекта изготовления ПСФ – геометрические характеристики фильтрующих отверстий и параметры соответствующего технологического процесса навивки.

Анализ геометрии фильтрующих отверстий

Рассмотрим сначала расстояние между осями двух соседних витков в проекции на плоскость, перпендикулярную оси витка (рис. 2).

Считаем, что эти оси представляют собой правильные n-угольники. Угловое смещение соседних витков после навивки должно происходить таким образом, чтобы образующийся зазор был максимален. Для этого необходимо, чтобы угол одного многоугольника находился против середины стороны

смежного витка. В этом случае получаемые далее результаты дадут верхнюю оценку размеров фильтрующих отверстий во всех возможных вариантах.

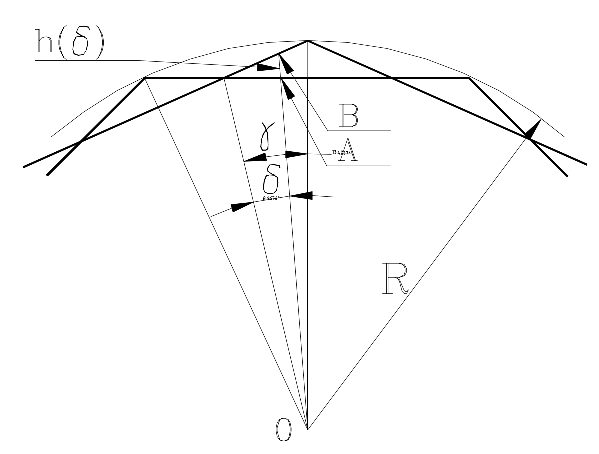


Рис. 2. *К расчету расстояния между осями соседних витков ПСФ*

Если центральный угол, опирающийся на сторону многоугольника, равен $2\pi/n$, то при наличии симметрии зазора относительно радиуса, делящего этот угол пополам, достаточно анализировать форму и размеры зазора в пределах угла $0 \le \gamma \le \pi/n$. Пусть R – радиус описанной вокруг многоугольника окружности. Тогда из простых геометрических построений (рис. 2) следует, что величина зазора h между осями будет функцией угла δ, отсчитываемого от вертикального радиуса, причем $0 \le \delta \le \gamma$:

$$h(\delta) = OB - OA,$$

$$OA = \frac{OC}{\cos(\gamma-\delta)} = \frac{R\cos\gamma}{\cos(\gamma-\delta)},$$

$$OB = \frac{OD}{\cos\delta} = \frac{R\cos\gamma}{\cos\delta};$$

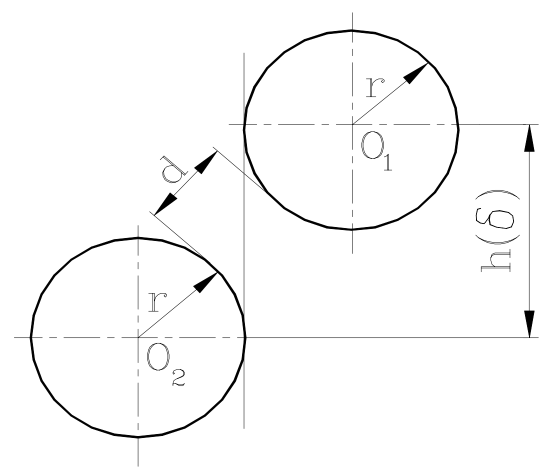


Рис. 3. *К оценке зазора между витками ПСФ*

$$h(\delta) = R\cos\gamma\left[\frac{1}{\cos\delta} - \frac{1}{\cos(\gamma-\delta)}\right]. \qquad (1)$$

При $\delta = \gamma/2$ величина h обращается в ноль, при $\delta > \gamma/2$ величина h формально становится отрицательной. Из рис. 2 следует, что в соседних витках оси просто "меняются местами", а величина зазора по-прежнему определяется соотношением (1).

Для оценки формы и размеров фильтрующих отверстий (микроканалов) рассмотрим теперь два соседних витка круглой проволоки в плоскости осевого сечения фильтра (рис. 3). Если радиус сечения проволоки равен r, то d (расстояние между соседними витками, измеряемое вдоль прямой, проходящей через центры витков) определится выражением

$$d = OO_1 - 2r.$$

В случае плотной навивки два соседних витка в осевом направлении прижаты друг к другу. При этом

$$OO_1 = \sqrt{(2r)^2 + [h(\delta)]^2},$$

$$d = \sqrt{4r^2 + h^2(\delta)} - 2r,$$

где $h(\delta)$ определяется соотношением (1), или окончательно

$$d = \sqrt{R^2\cos^2\gamma\left[\frac{1}{\cos(\gamma-\delta)} - \frac{1}{\cos\delta}\right]^2 + 4r^2} - 2r.$$

Легко увидеть, что

$$\max d\,\big|_{\delta=0} = \sqrt{R^2(1-\cos\gamma)^2 + 4r^2} - 2r,$$

$$\min d\,\Big|_{\delta=\frac{\gamma}{2}} = 0.$$

На рис. 4 приведены формы фильтрующих отверстий для некоторых значений R, r, n (внешние верхняя и нижняя кривые на рисунках). Можно отметить, что по мере увеличения числа граней оправки растет длина каждого из фильтрующих отверстий, а сами отверстия (микроканалы) становятся более "неправильными", если за меру правильности принять отклонение отношения наибольшего и наименьшего поперечных размеров отверстия от единицы.

Как далее будет показано, реально ось проволоки в вершинах правильного многоугольника, о котором шла речь выше, должна иметь некоторый радиус скругления ρ. При этом меняются оценки, полученные для $h(\delta)$ и далее для зазора d.

Величина поправки Δh может быть получена относительно простыми выкладками и составляет

$$\Delta h = \rho\left[\frac{1}{\cos(\gamma-\delta^*)} - \frac{1}{\cos\delta^*}\right], \qquad (2)$$

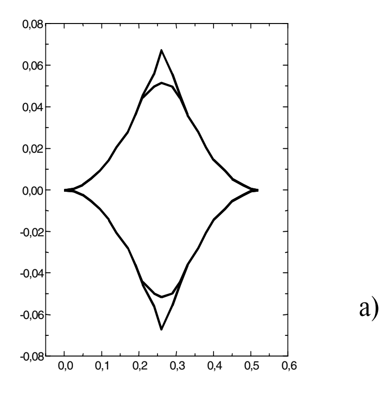
где

$$\delta^* = \delta\frac{\rho}{R};$$

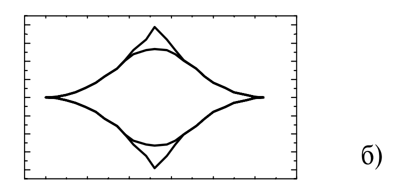
выражение (2) сохраняет свою силу в пределах угла $0 \le \delta \le \gamma\frac{\rho}{R}$. При больших значениях δ, справедлива оценка (1).

Окончательно

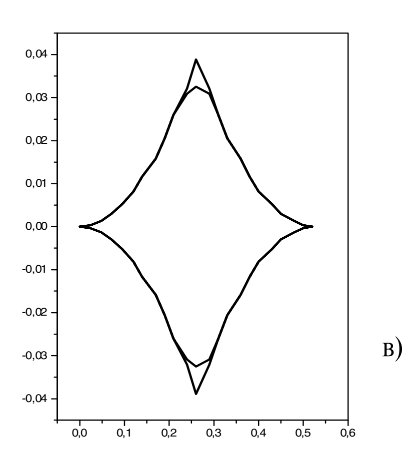
$$h(\delta) = \begin{cases} R\cos\gamma\left[\frac{1}{\cos(\gamma-\delta)} - \frac{1}{\cos\delta}\right], & \gamma\frac{\rho}{R} \le \delta \le \gamma, \\ R\cos\gamma\left[\frac{1}{\cos(\gamma-\delta)} - \frac{1}{\cos\delta}\right] - \rho\left[\frac{1}{\cos(\gamma-\delta\frac{R}{\rho})} - \frac{1}{\cos\delta\frac{R}{\rho}}\right], & 0 \le \delta \le \gamma\frac{\rho}{R}. \end{cases} \qquad (3)$$



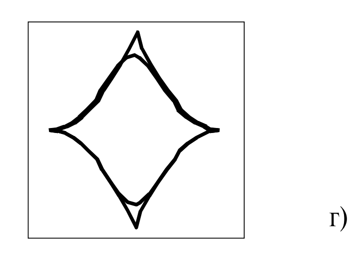
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. *Формы и размеры фильтрующих отверстий в зависимости от параметров намотки: радиуса витка R, радиуса скругления ρ, числа сторон многоугольника в сечении оправки n (радиус проволоки r=0,5 мм): а) R = 8 мм, ρ = 2 мм, n = 6; б) R = 6 мм, ρ = 2 мм, n = 6; в) R = 6 мм, ρ = 1 мм, n = 6; г) R = 8 мм, ρ = 2 мм, n = 8*

Можно отметить, что при радиусе скругления ρ, равном радиусу оси витка в его вершине R, величина зазора $h(\delta)$ становится нулевой.

Учет наличия скругления в вершине витка приводит к некоторому изменению формы фильтрующего отверстия. Результаты, иллюстрирующие это, приведены на рис. 4. Вправо откладывается расстояние вдоль окружности в пределах одного фильтрующего отверстия, вверх и вниз от нулевой линии отложены размеры отверстия в соответствии с формулой (3), при этом учитывается скругление оси витка в вершине многоугольника. Внутренние "сглаженные" кривые отличаются от аналогичных кривых без скруглений лишь в окрестности вершины фильтрующего отверстия, совпадая на остальной части контура. Отметим, что масштабы изображений на рис. 4, *а* и рис. 4, *б* одинаковы, то же можно сказать про масштабы на рис. 4, *в* и рис. 4, *г*. Уменьшение радиуса витка (размера оправки) меняет форму фильтрующего отверстия (сравним результаты на рис. 4, *а* и 4, *б*), делая ее менее вытянутой. Следует обратить внимание на разные масштабы вдоль окружности (вдоль оси OX, если пользоваться привычной декартовой системой координат) и вдоль радиуса (оси OY). Такие масштабы выбраны для наглядности изображения – если взять их одинаковыми, то рисунки "сжимаются" вдоль оси OY, и проанализировать их форму не удается. Результаты на рис. 4, *б*, в отвечают разным радиусам скругления в вершинах многоугольника (профиля оправки). При этом на рис. 4, *в* масштаб вдоль OY вдвое меньше, чем на рис. 4, *а*, *б*. Наконец, на рис. 4, *г* приведено условное (в силу отличия масштабов) изображение, когда отличие с результатами рис. 4, *а* сводится лишь к самому профилю – на рис. 4, *г* результаты отвечают профилю в виде восьмигранного прутка.

Оценка параметров технологического процесса навивки спирали

Витки ПСФ после навивки сохранят форму, отчасти повторяющую форму оправки, только в том случае, если при намотке в проволоке будут возникать пластические деформации. В противном случае при снятии навитой пружины с оправки проволока вернется в исходное состояние.

Считаем, что применима гипотеза плоских сечений, т.е. плоские сечения, перпендикулярные оси проволоки до ее деформации, остаются плоскими и перпендикулярными оси после деформации. Тогда в любой точке поперечного сечения деформация зависит от растяжения проволоки и ее изгиба [2]:

$$e^{z} = e + z\kappa,$$

где e – продольная деформация оси проволоки, z – расстояние точки от оси проволоки, e^{z} – деформация в этой точке, κ – кривизна (искривление) оси проволоки.

Если считать, как это принималось выше, что ось витка пружины представляет собой правильный n-угольник, то выполнение гипотезы плоских сечений становится невозможным, поскольку для этого верхняя часть плоскости поперечного сечения в вершине n-угольника должна "раздвоиться",

а нижние части смежных сечений должны накладываться друг на друга. Поэтому далее считаем, что ось проволоки в этой вершине имеет некоторый конечный радиус скругления ρ_0. Тогда $\kappa_0 = 1/\rho_0$, и формула (2) примет вид

$$e_0^z = e_0 + \frac{z}{\rho_0},$$

где индекс 0 отвечает состоянию навивки, а вводимые далее аналогичные величины с индексом 1 отвечают состоянию, когда нагрузка навивки полностью снята. Примем для конкретности, что проволока при навивке ее на оправку и при полной разгрузке подчиняется соотношениям теории малых упругопластических деформаций [3]. Для материала проволоки принимаем модель упругопластического материала с линейным упрочнением.

Тогда в нагруженном состоянии напряжения подчиняются соотношениям

$$\sigma_0 = \begin{cases} Ee_0, & (e_0 \le e_s), \\ Ee_s + E_1(e_0 - e_s), & (e_0 > e_s); \end{cases}$$

где e_s – деформация, соответствующая началу пластического деформирования материала, E – модуль упругости, E_1 – модуль упрочнения.

После разгрузки в проволоке остаются деформации e_1, а соответствующие напряжения будут

$$\sigma_1 = \begin{cases} Ee_1, & (e_1 < e_s), \\ Ee_s + E_1(e_0 - e_s) - E(e_0 - e_1), & (e_1 > e_s). \end{cases} \qquad (4)$$

При выводе этих соотношений принимается, что при снятии нагрузки кривая "напряжения-деформации" идет параллельно начальному упругому участку этой же кривой при нагружении. Такое предположение основано на экспериментальных исследованиях и используется достаточно часто.

Напряжения (4) должны удовлетворять интегральным условиям равновесия в данном сечении. Они представляют собой равенство нулю продольной силы N и изгибающего момента M в сечении проволоки:

$$N = 2\int_{-r}^{r} \sigma_1(z)\sqrt{r^2 - z^2}\,dz = 0,$$
$$M = 2\int_{-r}^{r} \sigma_1(z)\sqrt{r^2 - z^2}\,z\,dz = 0. \qquad (5)$$

Таким образом, общий алгоритм оценки формы витка ПСФ после снятия нагрузки представляется следующим образом. Задаваясь исходными значениями деформации проволоки в вершине витка, т.е. значениями деформации e_0 и кривизны оси витка ρ_0, находим такие значения остаточной деформации e_1 и остаточной кривизны ρ_1, при которых выполняются условия (5). Для определения этих двух параметров, характеризующих остаточную деформацию в любой точке сечения, условий (5) вполне достаточно. Далее становится возможным анализ размеров и формы микроканалов ПСФ - фильтрующих отверстий. Проведением параметрических исследований можно решать и обратную задачу – по заданным геометрическим характеристикам фильтрующих отверстий определять форму оправки, толщину проволоки и технологические параметры навивки, обеспечивающие эти характеристики.

В силу разброса реальных свойств материала проволоки расчеты дают лишь ориентировочные значения усилия натяжения и начального радиуса скругления проволоки в вершинах профиля оправки. Тем не менее, они являются полезными, значительно сокращая время опытной отработки технологического процесса.

Выводы

1. Проволочные спиральные фильтрэлементы перспективны для очистки гетерогенных газовых и жидкостных сред ввиду не только их быстрой и простой регенерации, но и допустимости регулирования формы и размеров фильтрующих отверстий. В связи с этим возможна настройка фильтрующих элементов на конкретные параметры среды. Более того, очевидны перспективы изготовления каскадов таких фильтров, когда каждый последующий набор фильтров проводит более высокую очистку среды.
2. Полученные результаты можно использовать для выбора геометрических параметров (размеров и формы) оправки, обеспечивающих получение элементов с заданными размерами фильтрующих отверстий. Для конкретных деформационно-прочностных свойств материала проволоки получены оценки параметров технологического процесса навивки в зависимости от заданных геометрических характеристик фильтрующих отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крапухин В.Б., Митрофанов Ю.А. Очистка жидких и газовых сред от механических примесей // Сборник научных трудов Северского технологического института. – Северск, 1999.
2. Прочность, устойчивость, колебания // Справочник в 3-х т. Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948. – 376 с.